

大洗研究所(北地区) HTTR原子炉施設

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価について

令和4年3月17日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

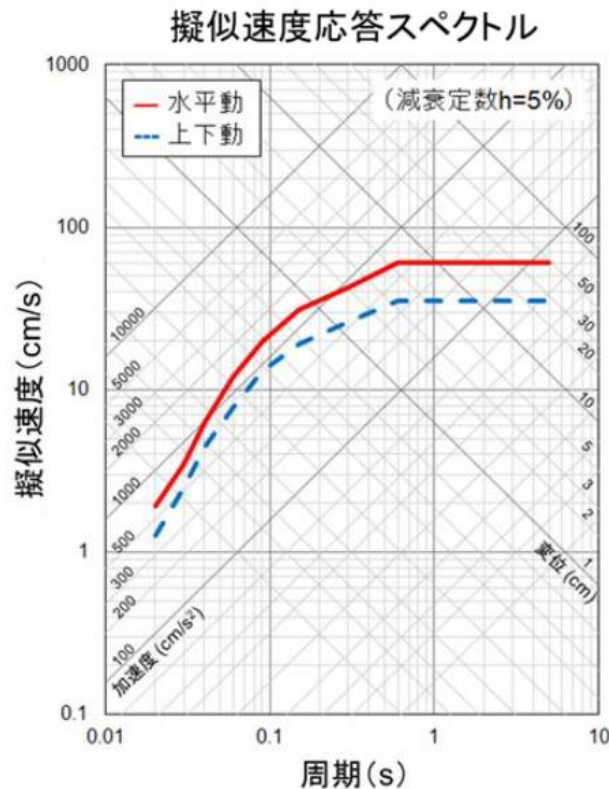
1. 検討概要	.....	2
2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価	.....	3
3. 基準地震動	.....	14
4. 参考文献	.....	16
補足資料		
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)	.....	17

1. 検討概要

- 試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈の一部改正により、震源を特定せず策定する地震動のうち全国共通に考慮すべき地震動の策定に当たっては、「震源近傍の多数の地震動記録に基づいて策定した地震基盤相当面における標準的な応答スペクトル」(以下「標準応答スペクトル」という。)を用いることが新たに規定された。
- 標準応答スペクトルを用いて地震動評価を実施した結果、これまで策定した基準地震動($S_s-D, S_s-1 \sim S_s-5$)を一部の周期帯で上回ることから、標準応答スペクトルを考慮した地震動を基準地震動 S_s-6 として選定する。

■ 標準応答スペクトルの概要

震源近傍の多数の地震動記録に基づいて策定した地震基盤相当面（地震基盤からの地盤増幅率が小さく地震動としては地震基盤面と同等とみなすことができる地盤の解放面で、せん断波速度 $V_s = 2,200\text{m/s}$ 以上の地層をいう。）における標準応答スペクトルとして次の図に示すものとする。



コントロールポイント

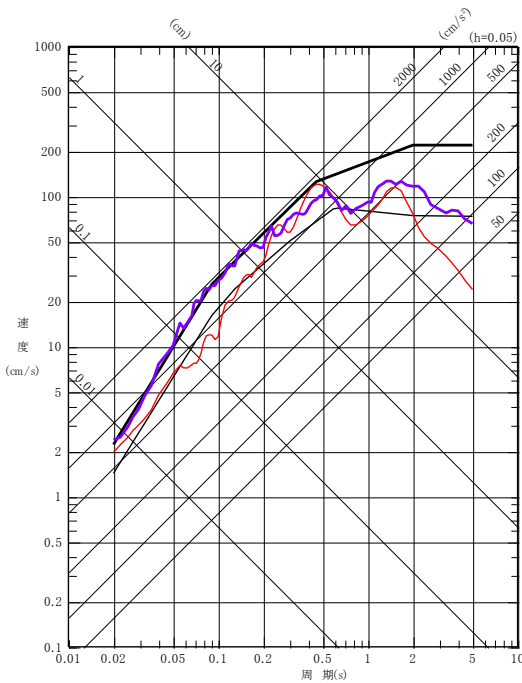
周期 (s)	水平動	上下動
	擬似速度 (cm/s)	擬似速度 (cm/s)
0.02	1.910	1.273
0.03	3.500	2.500
0.04	6.300	4.400
0.06	12.000	7.800
0.09	20.000	13.000
0.15	31.000	19.000
0.30	43.000	26.000
0.60	60.000	35.000
5.00	60.000	35.000

地震基盤相当面における標準応答スペクトル

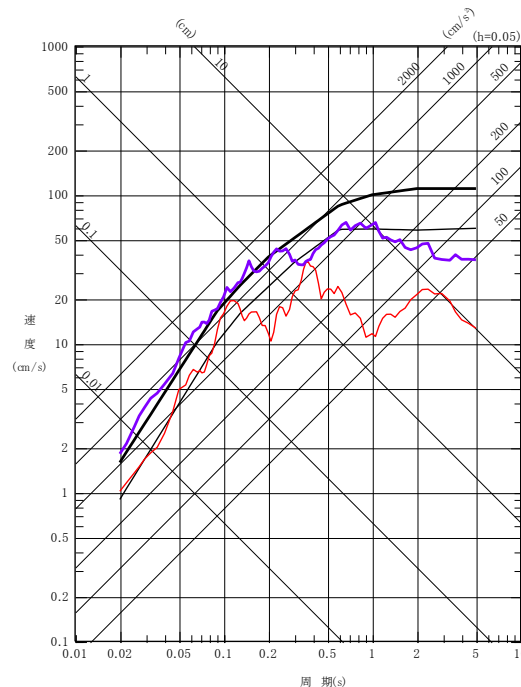
※2021年4月21日原子力規制委員会資料より抜粋

2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 地震動評価の検討方針

- 基準地震動 S_s の策定にあたって「震源特定せず策定する地震動」は、「2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動」、「加藤ほか(2004)に基づき設定した応答スペクトル」を考慮しており、これらは基準地震動 S_s-D に包絡されることを確認している。
- 今回策定された「標準応答スペクトル」は、「2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動」の応答スペクトルとの間には大きな差はないとされているが、大洗研の深部地盤モデルを用いた地震動評価の応答スペクトルが大きい評価結果になることを確認しており、これは大洗研の深部地盤モデル(地震基盤相当面の物性の差異等※)に起因するものと考えている。
- このため、大洗研の「標準応答スペクトルを考慮した地震動」の評価にあたっては、標準応答スペクトルが設定された $V_s=2,200\text{m/s}$ と大洗研の地震基盤相当面($V_s=3,052\text{m/s}$)との差異を考慮する。(次ページ以降に示す。)



応答スペクトル(水平成分)



応答スペクトル(鉛直成分)

- S_s-D 応答スペクトル手法による基準地震動
- 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動
- 加藤ほか(2004)に基づき設定した応答スペクトル
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動

※ 「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム報告書」^{1),2)}においては、「一般に $V_s=2,000\sim 3,000\text{m/s}$ 程度での地盤増幅率は十分小さいと仮定し、地震基盤面での地震動レベルと考える」とされている。一方、大洗研の深部地盤構造モデルでは、 $V_s=3,000\text{m/s}$ から $V_s=2,000\text{m/s}$ の地層で地震動が増幅しており、これは地盤減衰を近年の知見に対して小さめに設定していることが主要因と推定される。

- 地震動の増幅特性の考慮に際しては、標準応答スペクトルが設定された $V_s=2,200\text{m/s}$ と敷地の地震基盤相当面とした $V_s=3,052\text{m/s}$ との地盤物性の差異を地震動評価に反映させるため、以下の検討を行い、応答スペクトル強さの大きい方を選定する。

検討① 透過係数を用いた検討

$V_s=3,052\text{m/s}$ と $V_s=2,200\text{m/s}$ の地盤物性が異なる影響について、透過係数(インピーダンスによる差異)を考慮して地盤応答解析を行い、解放基盤表面の地震動を評価する。

検討② 地震基盤相当面以深を $V_s=2,200\text{m/s}$ とした検討

標準応答スペクトルが、 $V_s=2,200\text{m/s}$ で設定された応答スペクトルであること、KiK-netひたちなか観測点※の地震基盤相当面の V_s 値が、 $2,200\text{m/s}$ であることから、既往の地盤構造モデルのG.L.-1.293km位置を $V_s=2,200\text{m/s}$ として地盤応答解析を行い、解放基盤表面の地震動を評価する。

地盤構造モデル

(No.)	上面 G.L.(km)	S波速度 (km/s)	
1	0.00	-	▼解放基盤表面
2	-0.173	1.010	
3	-0.273	1.186	
4	-0.623	2.086	▼地震基盤相当面
5	-1.293	3.052	
6	-4.000	3.600	
7	-15.900	4.170	
8	-30.500	4.320	

※敷地周辺に位置するKiK-netひたちなか観測点(IBRH18)は、せん断波速度 $V_s 2,200[\text{m/s}]$ の硬質岩盤が確認されており、地震基盤相当面と見なせる。

- 試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈の一部改正を踏まえ、敷地において、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価を実施する。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価を以下の流れで実施する。

【標準応答スペクトルを考慮した地震動の検討の流れ】

①地震基盤相当面における標準応答スペクトルに基づく模擬地震波の作成



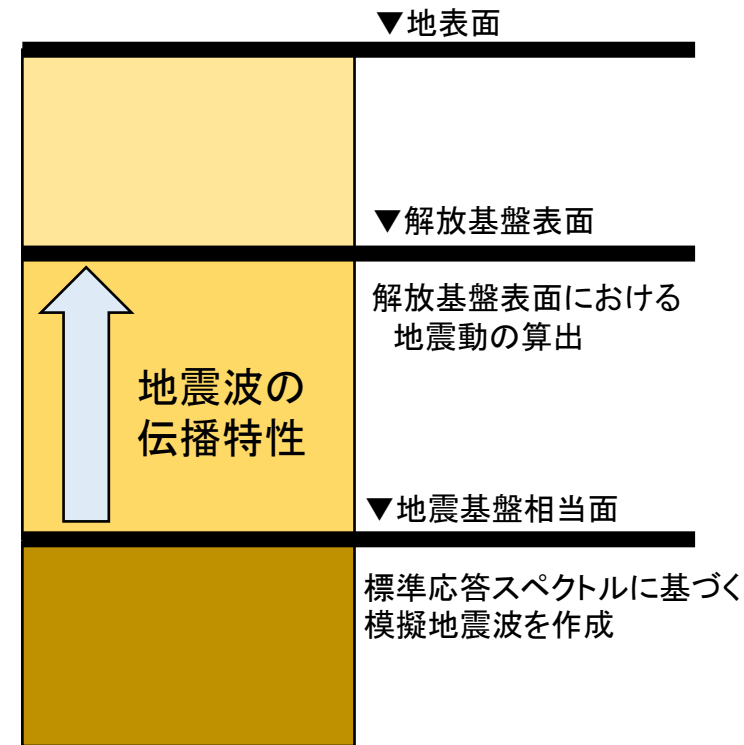
②地盤構造モデルを設定



③解放基盤表面における地震動の算出



④現行の基準地震動Ss-Dとの比較

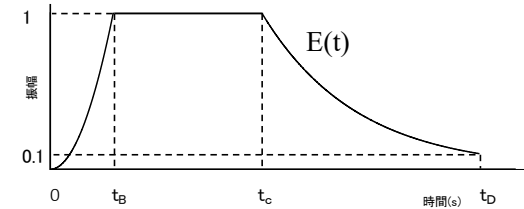


標準応答スペクトルを考慮した地震動の評価のイメージ

- 模擬地震波は、乱数の位相を持つ正弦波の重ね合わせによって作成するものとし、振幅包絡線の経時的変化については、Noda et al.(2002)³⁾の方法に基づき、下記に示す形状とする。

模擬地震波	目標最大加速度 (cm/s ²)	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時的変化(s)		
			t _B	t _C	t _D
水平成分	600	28.0	3.3	15.0	28.0
鉛直成分	400	28.0	3.3	15.0	28.0

マグニチュード: M=6.9、等価震源距離: X_{eq}=10km

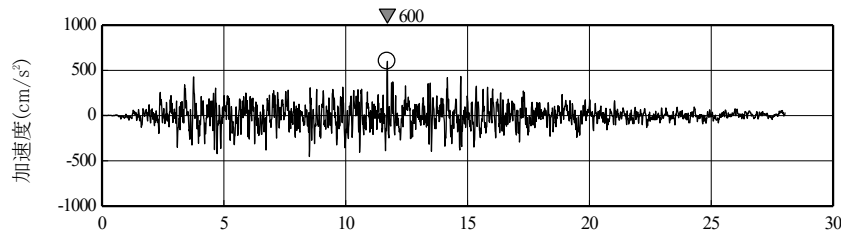


$$t_B = 10^{0.5M - 2.93}$$

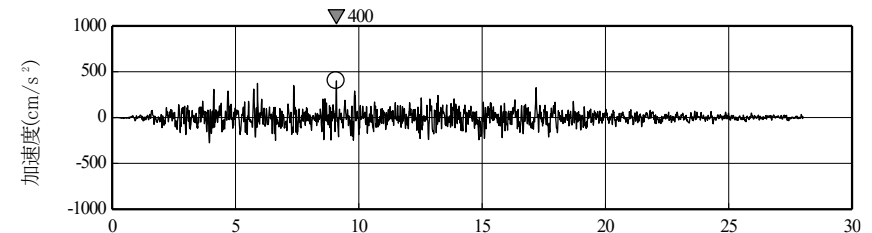
$$t_C - t_B = 10^{0.3M - 1.0}$$

$$t_D - t_C = 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6}$$

$$E(t) = \begin{cases} (t/t_B)^2 & 0 \leq t \leq t_B \\ 1 & t_B \leq t \leq t_C \\ \exp[(\ln 0.1)(t-t_C)/(t_D-t_C)] & t_C \leq t \leq t_D \end{cases}$$



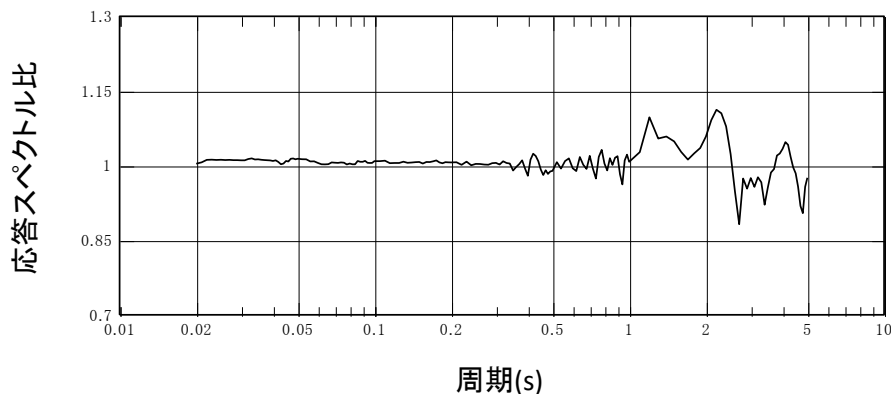
水平成分



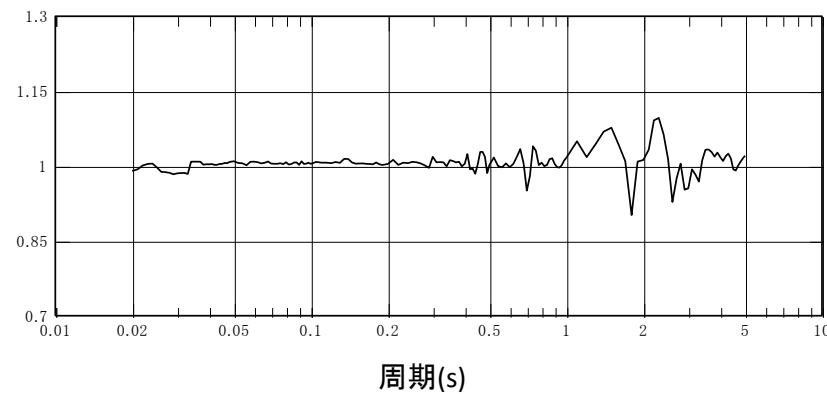
鉛直成分

地震基盤相当面における標準応答スペクトルに適合する模擬地震波(加速度時刻歴波形)

- 作成した模擬地震波が、日本電気協会(2015)⁴⁾に示される以下の適合度の条件を満足していることを確認する。
- 目標とする応答スペクトル値に対する模擬地震波の応答スペクトル値の比(応答スペクトル比)が全周期帯で0.85以上、応答スペクトル強さの比(SI比)が1.0以上。



応答スペクトル比(水平成分)



応答スペクトル比(鉛直成分)

応答スペクトル強さの比(SI比)

模擬地震波	SI比
水平成分	1.04
鉛直成分	1.03

$$R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

$$SI比 = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T)}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T)} \geq 1.0$$

ただし、
 $R(T)$: 応答スペクトル比
 T : 周期(s)
 $S_{v1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値
 $S_{v2}(T)$: 目標とする応答スペクトル値

ただし、
 SI : 応答スペクトル強さ
 $S_v(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル
 $\bar{S}_v(T)$: 目標とする応答スペクトル
 T : 固有周期(s)

作成した模擬地震波は、日本電気協会(2015)⁴⁾に示される適合度の条件を満足していることを確認した。

2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 検討① 透過係数を用いた検討

- $V_s=3,052\text{m/s}$ と $V_s=2,200\text{m/s}$ の地盤物性が異なる影響について、透過係数を模擬地震波に乗じて、地震基盤相当面に入力し、解放基盤表面の地震動を評価する。
- 透過係数は弾性体の波動伝播理論に基づき算出する。

地盤構造モデル

	層番号 (No.)	上面 G.L. (km)	層厚 (km)	密度 (g/cm^3)	水平成分		鉛直成分			
					S波速度 (km/s)	減衰定数		P波速度 (km/s)	減衰定数	
						Q_s	h_s		Q_p	h_p
▼解放基盤表面	1	0.000	0.173	—	—	—	—	—	—	
	2	-0.173	0.100	1.98	1.010	100	0.005	2.170	100	0.005
	3	-0.273	0.350	2.11	1.186			2.590		
	4	-0.623	0.670	2.44	2.086			4.100		
▼地震基盤相当面	5	-1.293	2.708	2.68	3.052	$110 \times f^{0.69}$	$0.0045 \times f^{-0.69}$	5.750	$110 \times f^{0.69}$	$0.0045 \times f^{-0.69}$
	6	-4.000	11.900	2.70	3.600			5.960		
	7	-15.900	14.600	2.80	4.170			6.810		
	8	-30.500	∞	3.20	4.320			7.640		

波動インピーダンス比: $\alpha = (\rho_1 V_1 / \rho_2 V_2)$ 、地震動の透過係数: $\gamma = 2 / (1 + \alpha)$

ここで、 ρ_1 、 V_1 は大洗研のS波速度 $3,052\text{m/s}$ 層の弾性波速度 ($V_s = 3,052\text{m/s}$, $V_p = 5,750\text{m/s}$)と密度 (2.68g/cm^3)、 V_2 は標準応答スペクトルが規定されている層の弾性波速度 ($V_s = 2,200\text{m/s}$, $V_p = 4,290\text{m/s}$)、 ρ_2 はLudwig et al(1970)の計算式から算出した密度 (2.48g/cm^3)※2

水平成分のインピーダンス比 $\alpha_s = 1.499$ 、透過係数 $\gamma_s = 0.800$
鉛直成分のインピーダンス比 $\alpha_p = 1.448$ 、透過係数 $\gamma_p = 0.817$

したがって、水平成分は $600 \times 0.8 = 480\text{cm/s}^2$ 、鉛直成分は $400 \times 0.817 = 327\text{cm/s}^2$ を地震基盤相当 (G.L.-1.293km)に入力する。

※1 : P波速度はYoshimura et al(1982)⁵⁾により $V_p = V_s / (0.576 - 0.139 / V_s)$

※2 : $\rho = 1.2475 + 0.3992 \times V_p - 0.026 \times V_p^2$

検討② 地震基盤相当面以深を $V_s=2,200\text{m/s}$ とした検討

- 標準応答スペクトルが、 $V_s=2,200\text{m/s}$ で設定された応答スペクトルであることから、既往の地盤構造モデルのG.L.-1.293km位置を $V_s=2,200\text{m/s}$ として地盤応答解析を行い、解放基盤表面の地震動を評価する。
- P波速度は、Yoshimura et al(1982)⁵⁾により算出した。

地盤構造モデル

層番号 (No.)	上面 G.L. (km)	層厚 (km)	密度 (g/cm^3)	水平成分			鉛直成分			
				S波速度 (km/s)	減衰定数		P波速度 (km/s)	減衰定数		
					Q_s	h_s		Q_p	h_p	
▼解放基盤表面	1	0.000	0.173	—	—	—	—	—	—	—
	2	-0.173	0.100	1.98	1.010	100	0.005	2.170	100	0.005
	3	-0.273	0.350	2.11	1.186			2.590		
	4	-0.623	0.670	2.44	2.086			4.100		
▼地震基盤相当面	5	-1.293	2.708	2.68	3.052 ⇒ 2.200	$110 \times f^{0.69}$	$0.0045 \times f^{-0.69}$	5.750 ⇒ 4.290	$110 \times f^{0.69}$	$0.0045 \times f^{-0.69}$
	6	-4.000	11.900	2.70	3.600			5.960		
	7	-15.900	14.600	2.80	4.170			6.810		
	8	-30.500	∞	3.20	4.320			7.640		

P波速度: $V_p=V_s/(0.576-0.139/V_s)$

2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 解放基盤表面における地震動の比較(検討①,②の比較)

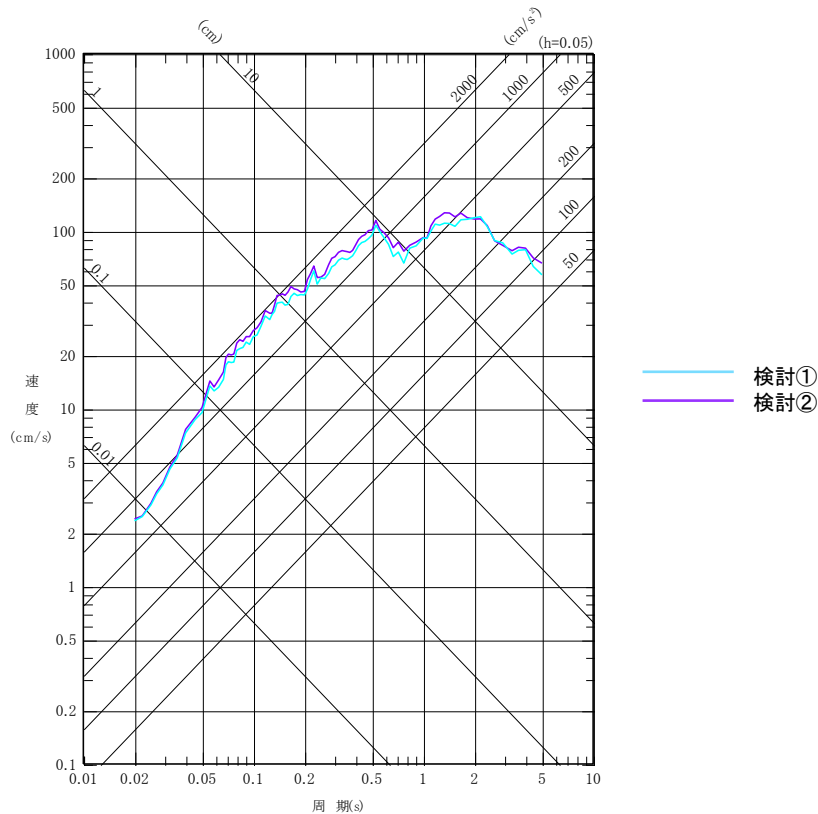
- 検討①,②の解放基盤表面の応答スペクトルを比較した結果を以下に示す。
- 各検討結果の地震動評価結果について、応答スペクトルの形状は同程度であるが、応答スペクトル強さの値が大きい、検討②を標準応答スペクトルを考慮した地震動として選定する。

水平成分

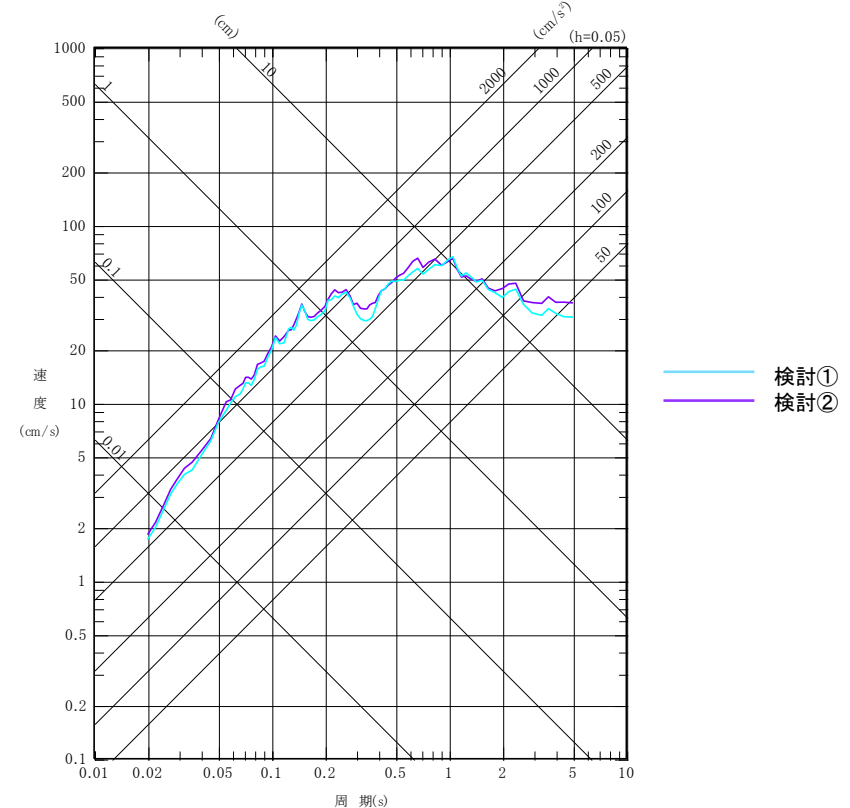
	検討①	検討②
最大加速度 (cm/s ²)	736	754
SI値※(周期0.1s~2.5s)	103	109

鉛直成分

	検討①	検討②
最大加速度 (cm/s ²)	537	572
SI値※(周期0.1s~2.5s)	52	54



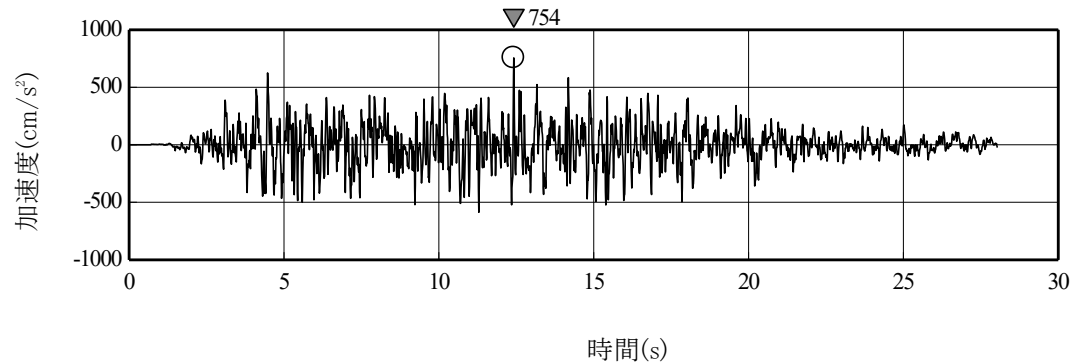
水平成分



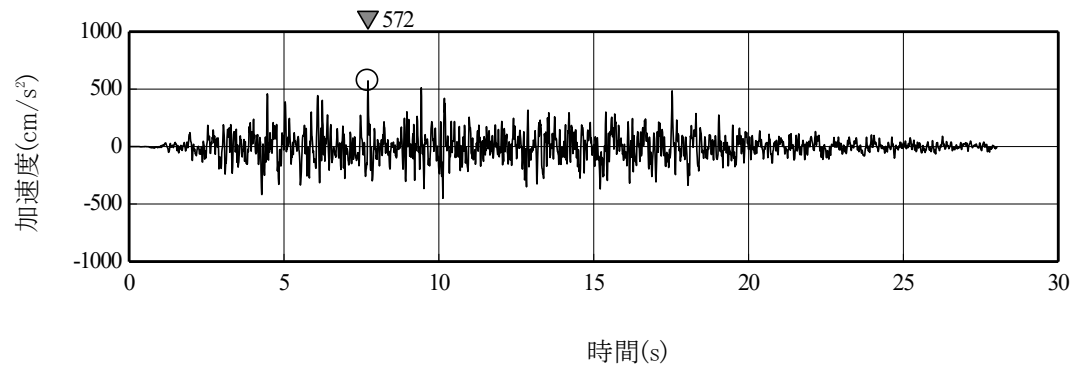
鉛直成分

2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 解放基盤表面における地震動の算出

- 解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動の加速度波形を下記に示す。



水平成分



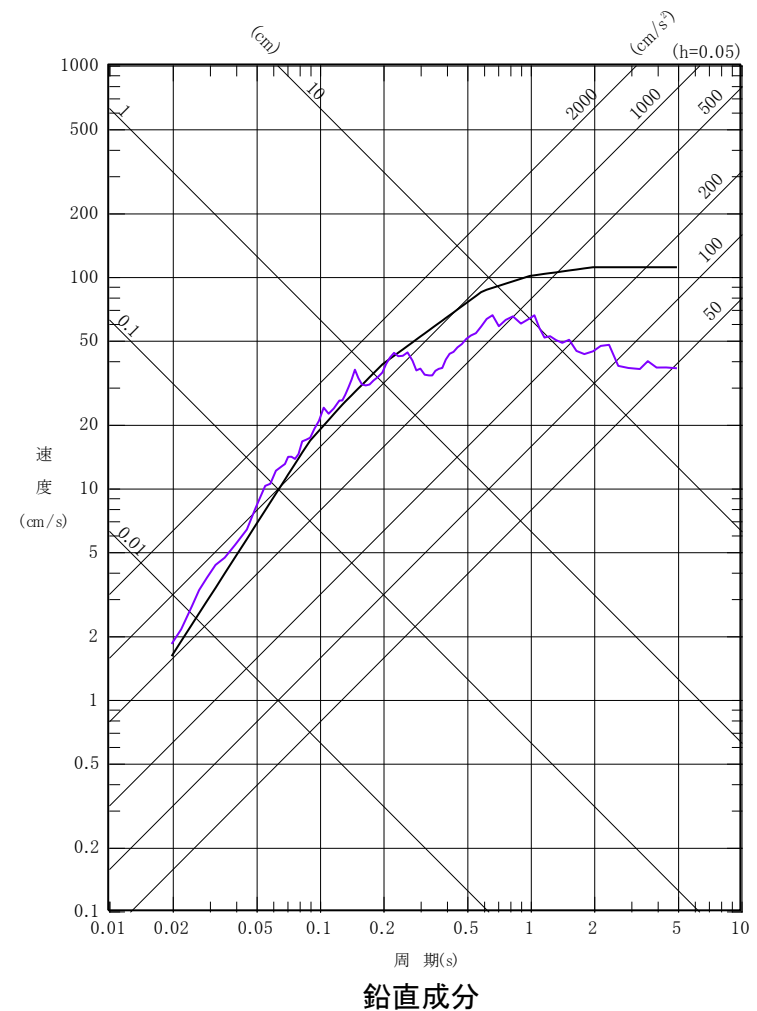
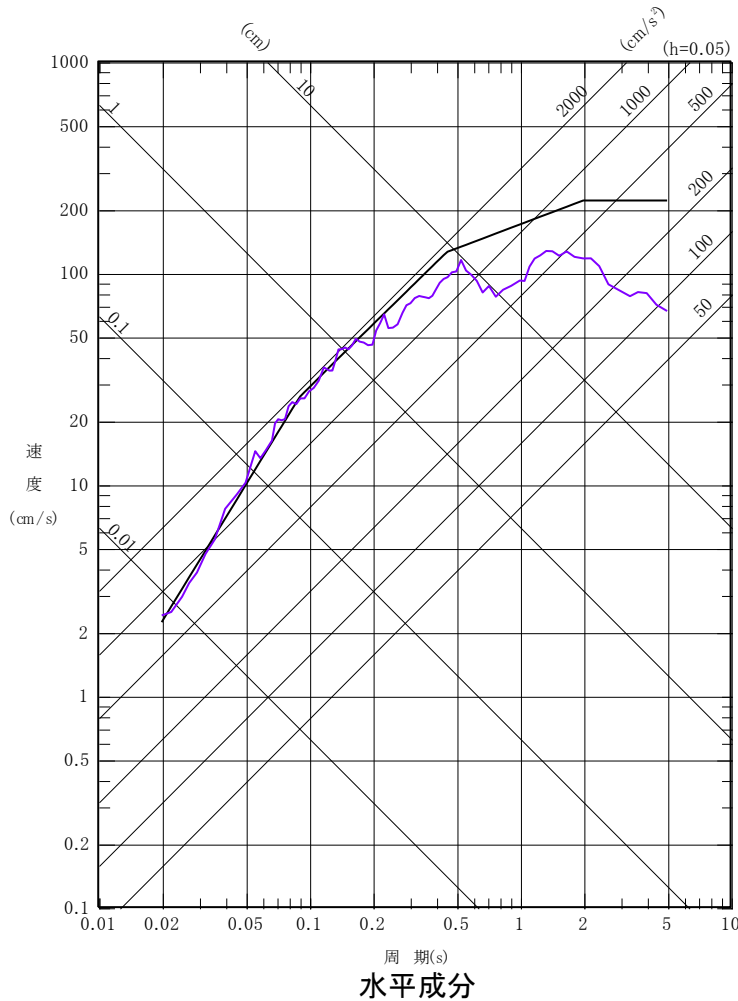
鉛直成分

解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動
加速度波形

2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 解放基盤表面における地震動の比較(基準地震動 S_s-D との比較)

- 解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動と基準地震動 S_s-D を比較する。

— S_s-D 応答スペクトル手法による基準地震動
— 標準応答スペクトルを考慮した地震動

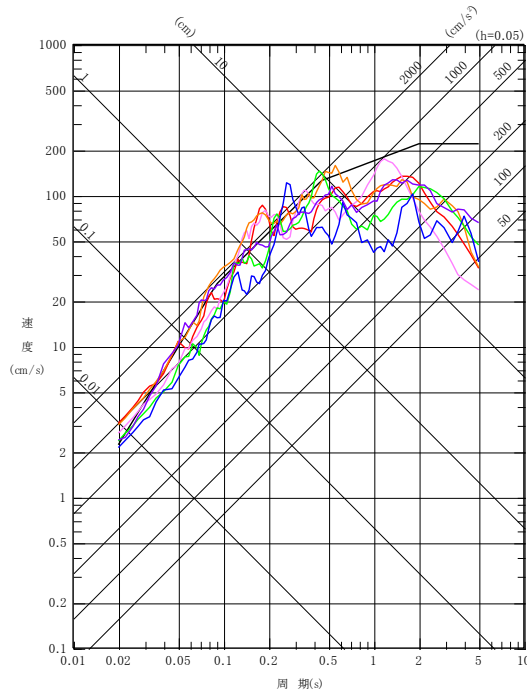


標準応答スペクトルを考慮した地震動は、一部の周期帯で基準地震動 S_s-D を上回ることから、基準地震動 S_s-6 として選定する。

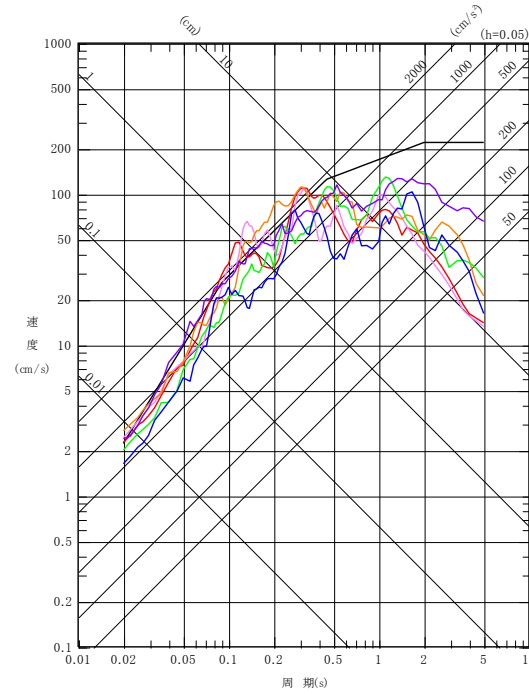
3. 基準地震動 基準地震動S_sの応答スペクトル

- 基準地震動S_sの応答スペクトルを示す。

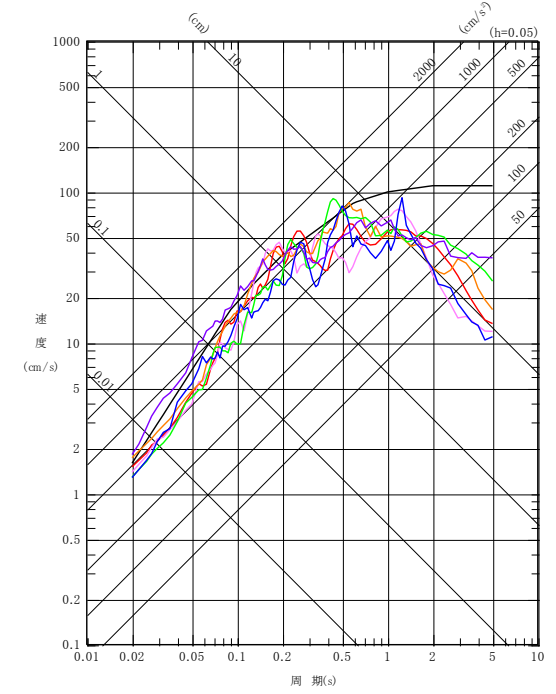
- S_s-D 応答スペクトル手法による基準地震動
- S_s-1 F3断層～F4断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)
- S_s-2 F3断層～F4断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)
- S_s-3 F3断層～F4断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)
- S_s-4 F3断層～F4断層による地震(断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点3)
- S_s-5 2011年東北地方太平洋沖型地震(SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重量)
- S_s-6 標準応答スペクトルを考慮した地震動



NS成分



EW成分



UD成分

3. 基準地震動 基準地震動S_s(最大加速度)

- 基準地震動S_s*¹の最大加速度の一覧を示す。

基準地震動		最大加速度 (cm/s ²)		
		NS成分	EW成分	UD成分
S _s -D	応答スペクトル手法による基準地震動			
S _s -1	F3断層～F4断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)			
S _s -2	F3断層～F4断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)			
S _s -3	F3断層～F4断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)			
S _s -4	F3断層～F4断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点3)			
S _s -5	2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)			
S _s -6	標準応答スペクトルを考慮した地震動			

※表中のグラフは各基準地震動S_sの加速度時刻歴波形(縦軸:加速度[cm/s²], 横軸:時間[s])

- 1) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム(2019): 全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書、令和元年8月7日.
- 2) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム(2019): 全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書 参考資料 標準応答スペクトルに係る検討について、令和元年8月7日.
- 3) Shizuo Noda, Kazuhiko Yashiro, Katsuya Takahashi, Masayuki Takemura, Susumu Ohno, Masanobu Tohdo, Takahide Watanabe. RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES. OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering Analysis, Istanbul, 16-18 October, 2002.
- 4) 日本電気協会(2015): 原子力発電所耐震設計技術指針、JEAG4601-2015.
- 5) Masayoshi Yoshimura, Seishi Fujii, Kenji Tanaka, Ken Morita. On the relationship between P and S-wave velocities in soft rock. SEG Expanded Abstracts 1, 1982, p.143.

補足資料

1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)



1. 基準地震動 S_s の策定の概要
2. 敷地周辺の地震発生状況
3. 地下構造評価
 - 3.1 評価の方針
 - 3.2 敷地の解放基盤表面の設定
 - 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討
 - 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定
 - 3.5 観測記録及び模擬入力波を用いた敷地地盤の振動特性評価
4. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動
 - 4.1 プレート間地震
 - 4.2 海洋プレート内地震
 - 4.3 内陸地殻内地震
5. 震源を特定せず策定する地震動
6. 基準地震動 S_s の策定
7. 基準地震動 S_s の年超過確率の参照

参考資料

参考1 震源を特定せず策定する地震動($M_w6.5$ 以上の地震に関する検討)

参考2 「日本海溝沿いの地震活動の長期評価」に対する確認結果について

参考文献

1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

検討の概要

【目的】 敷地で得られた単点微動観測記録により「敷地地盤における基盤の拡がり及び速度構造の均質性の把握」、敷地周辺で実施した広域にわたる反射法・屈折法地震探査により「敷地周辺の深部地盤の速度構造の把握」、微動アレイ探査により「敷地周辺の深部地盤の最適な速度構造の把握」、地震波速度トモグラフィ解析による「地震基盤以深の深部地盤の速度構造の推定」を実施する。

これらの探査、解析により、地震基盤を含む深部地盤の速度構造を把握する。

(1) 単点微動観測記録による検討

敷地内で等間隔に実施した単点微動観測で得られた地表の微振動観測記録を用いて算出されるH/Vスペクトルを整理することで、敷地地盤の速度構造の均質性及び敷地地盤における基盤の拡がりを確認する。

H/Vスペクトルによる検討

(2) 反射法・屈折法地震探査による検討

敷地周辺において重力異常を参照して東西、南北に配置した探査線に沿って、反射法・屈折法地震探査を行い、3次元的な深部地盤の空間分布を把握する。

弾性波探査によるP波速度分布、走時曲線の検討

(3) 微動アレイ探査による検討

解放基盤表面から地震基盤面の速度構造を把握するため、敷地近傍で実施した微動アレイ探査記録から求まる観測位相速度と、広域にわたる物理探査等から求まる理論位相速度を参照して、最適な速度構造を求めめる。

観測位相速度と理論位相速度による最適化検討

(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

各地の地震観測点で記録された自然地震（主に微小～小地震）の波形記録から到達時刻を読み取ることで得られる観測走時をターゲットに、解析モデルによる計算走時を最適化することで地震基盤以深の深部地盤の速度構造を推定する。

自然地震の観測走時と解析モデルによる最適化検討

地震基盤面を含む深部地盤の速度構造を推定することにより、敷地周辺の3次元的な地盤構造の把握及び深部地盤モデルの設定に資することができる

1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(1) 単点微動観測記録による検討

■ H/Vスペクトルに関する検討方法

【検討の目的】

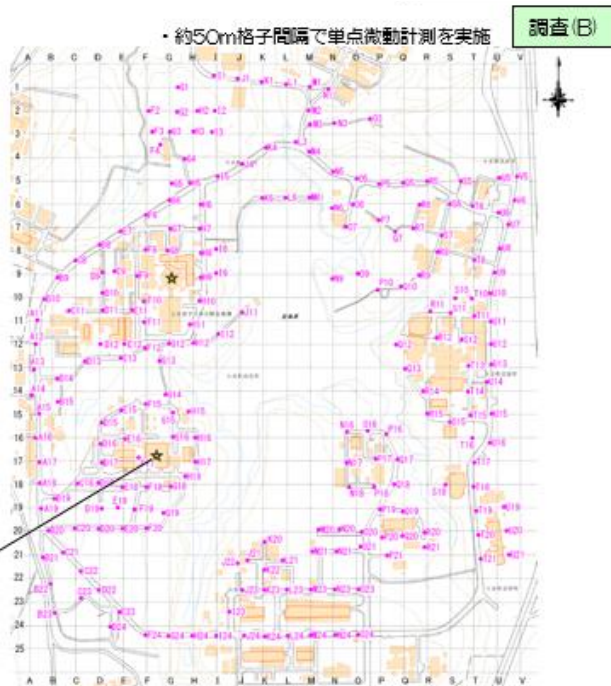
敷地において実施した単点微動計測によるH/Vスペクトル比を計算し、各観測点の振動特性を評価することにより、敷地直下の速度構造の均質性や基盤の拡がりを確認する。

【算出方法】

- 微動測定時間は、1地点につき15分間
- 観測時間分のデータを4096サンプル(40.96秒)ごとに20.48秒ずつオーバーラップさせながらセグメントに分割し、0.1HzのParzen windowを用いてデータを作成
- 区間ごとにフーリエ変換を実施し、水平両成分を相乗平均した観測H/Vスペクトル比を計算

$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{NS^2 + EW^2}}{UD}$$

HTRR原子炉建家



大洗研の測定位置図



地震計LE-3D/5S レナーツ社(独)
<http://www.lennartz-electronic.de/>



記録器 LS-8800 白山工業
<http://www.hakusan.co.jp/>

機器	機器名	製造会社	仕様	数量
地震計	LE-3D/5S	レナーツ社(独)	速度型上下・水平3成分	6
			固有周期・5/7秒切り替え式	
			電圧:DC12V	
記録器	LS-8800	白山工業	出力感度:4V/kine	6
			チャンネル数:3	
			分解能:24ビット	
			GPS時計内蔵	
			電圧:DC6.5~16V	

測定時間	15分
固有周期	7秒
サンプリング周波数	100Hz

微動計測器の機器特性

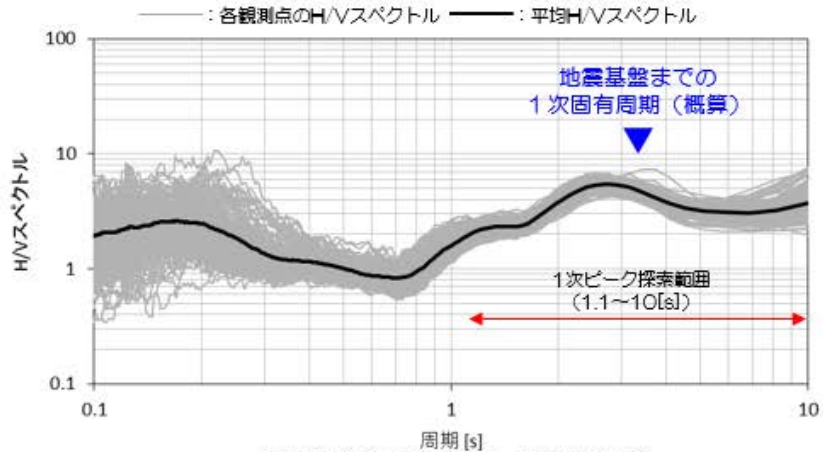
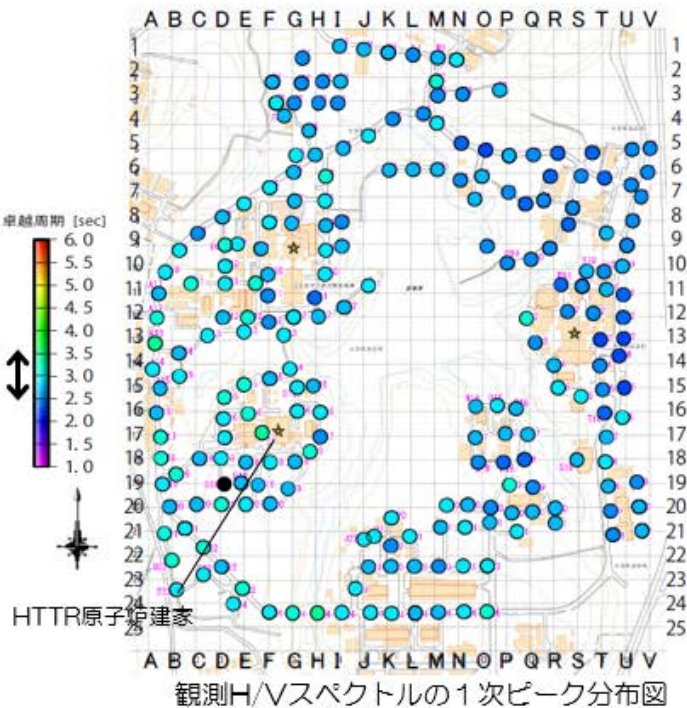
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(1) 単点微動観測記録による検討

■ 単点微動観測によるH/Vスペクトルの検討結果のまとめ

観測H/Vスペクトルはばらつきが少ないことが確認でき、敷地全体の観測点において概ね同様の傾向を示すことが確認できた。



地盤構造モデルから下記簡易式を用いて、地震基盤面までの1次固有周期を算出すると周期約3.3秒となる。

$$T_i = \frac{4H_i}{V_i} \quad V_i = \frac{\sum (V_{sj} \cdot L_j)}{H_i}$$

ここで、 T_i : i 層までの1次固有周期(s)、
 H_i : i 層までの深度(m)、
 V_i : i 層までの平均せん断波速度(m/s)、
 V_{sj} : j 層のせん断波速度(m/s)、
 L_j : j 層の層厚(m)

敷地における観測H/Vスペクトルについて、概ね同じようなスペクトル形状であることから、敷地地盤に局所的な速度構造はないと考えられる。また、地震基盤相当のスペクトルピークも安定して得られており、敷地直下の地震基盤面はほぼ等深度で一様に広がっていると考えられる。

1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(2) 反射法・屈折法地震探査による検討

調査(C)

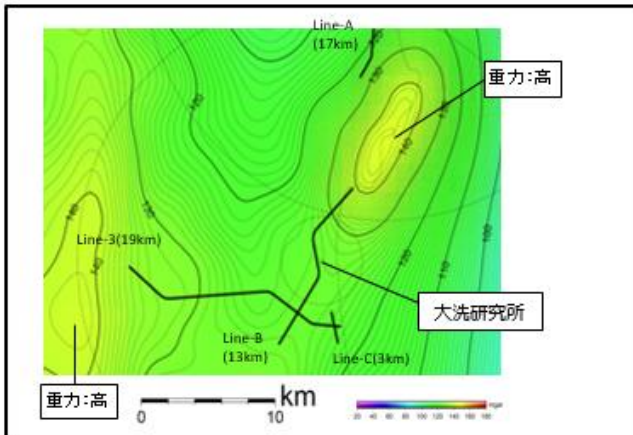
■ 地震探査側線の配置

地震探査の配置を右図に示す。
東西方向をLine-3、南北方向をLine-B、Cとする。

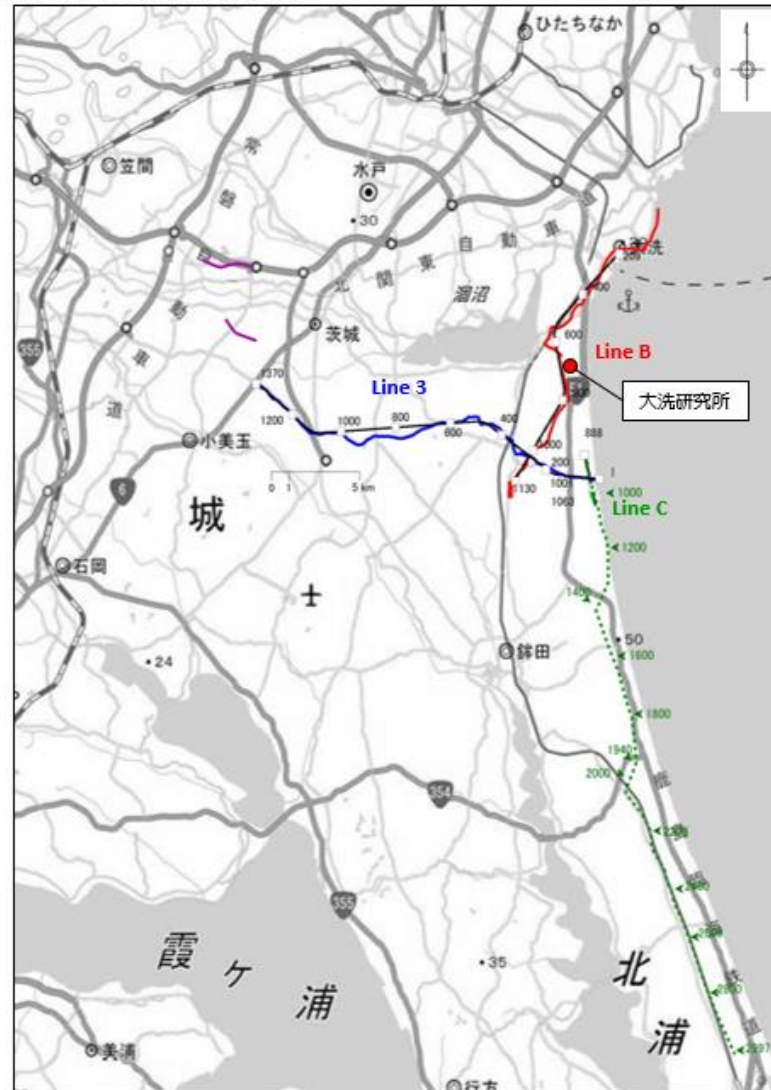
国土地理院 電子地図(インターネット公開版)に加筆

- Line 3
- Line B
- Line C

※ Line-1,2,Aについては東海地区における探査測線を示す。



重力異常図と反射法・屈折法探査測線の関係



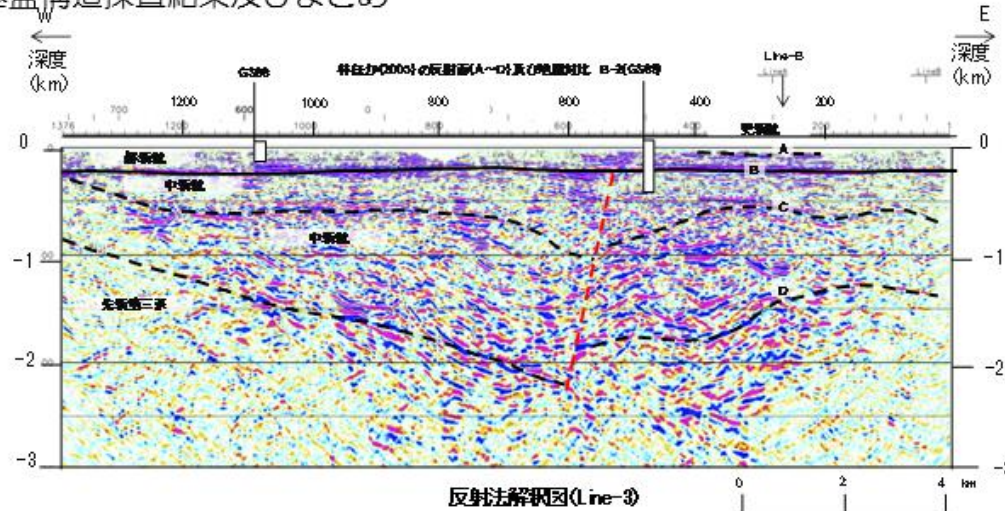
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

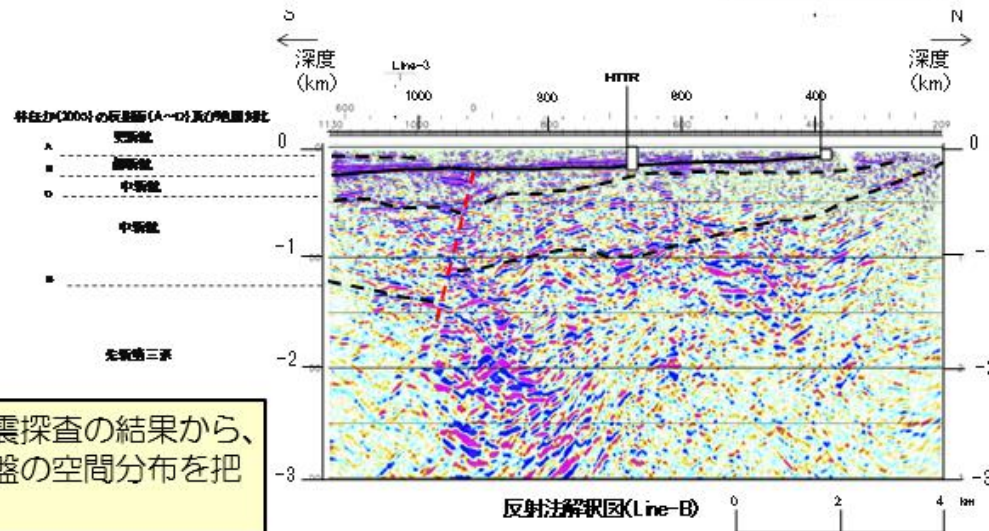
(2) 反射法・屈折法地震探査による検討

■ 地震探査結果に基づく基盤構造探査結果及びまとめ

Line-3 (東西)



Line-B (南北)



敷地周辺の反射法・屈折法地震探査の結果から、敷地周辺の3次元的な深部地盤の空間分布を把握した。

1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

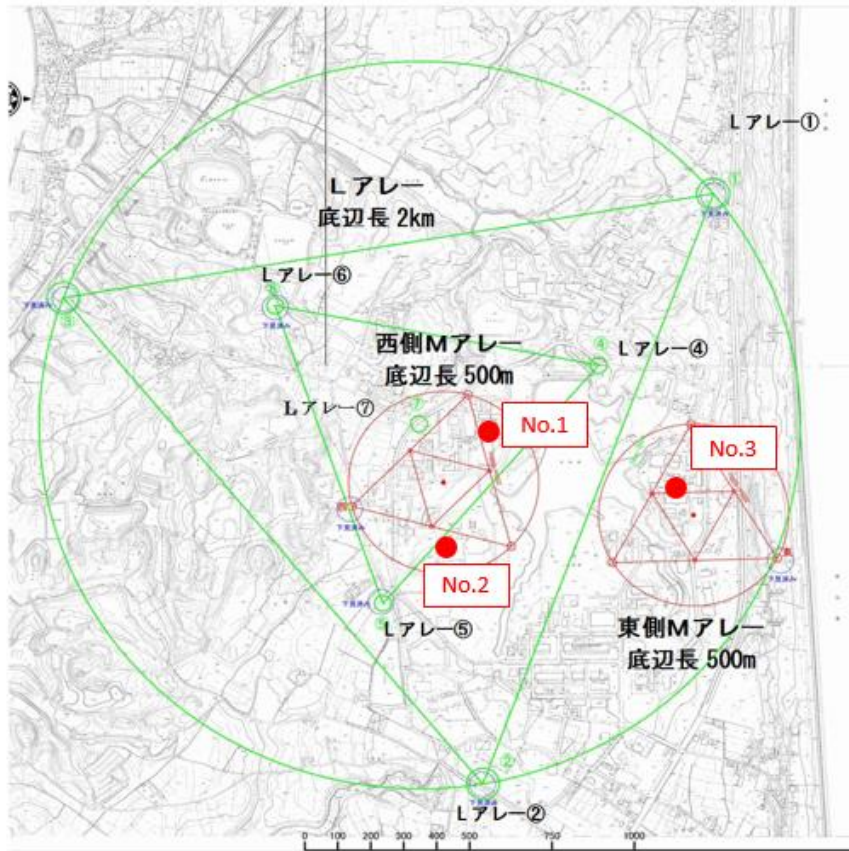
3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(3) 微動アレイ探査による検討

■ 微動アレイ探査位置と目的

調査(D)

敷地近傍の微動アレイ探査の主な目的としては、解放基盤表面から地震基盤にかけての速度構造を把握するためである。



微動アレイ探査位置

1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)



3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

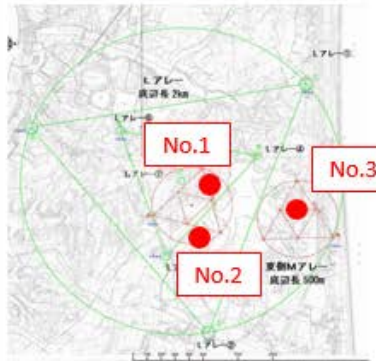
(3) 微動アレイ探査による検討

■ 微動アレイ探査結果

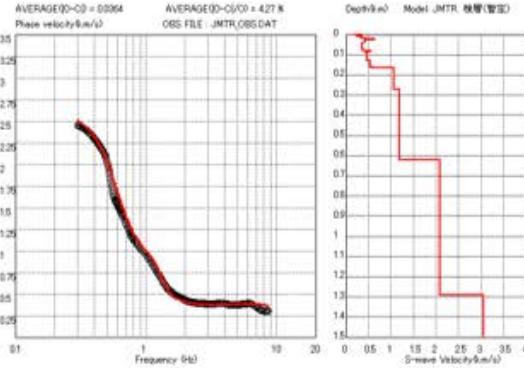
西 ← → 東

北 ↑

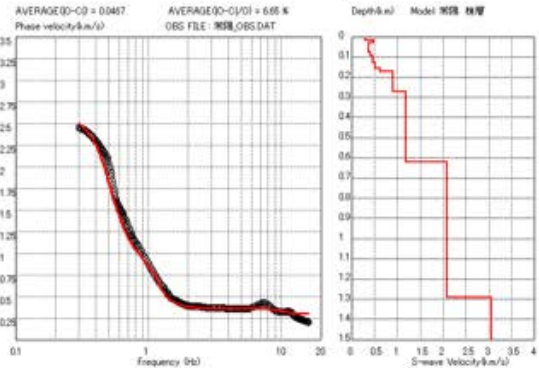
↓ 南



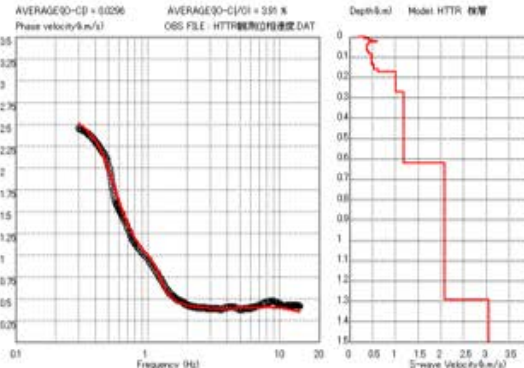
No.1



No.3



No.2



地震基盤相当（概ね Vs3km/s層）に着目すると、どの評価地点においても同様に評価されている。

1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

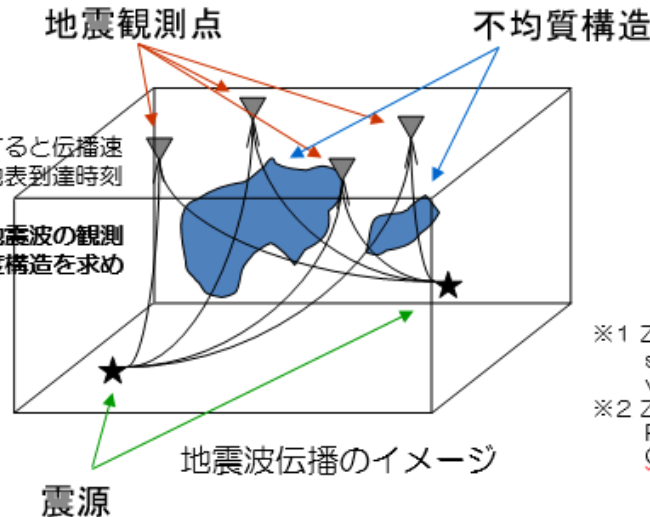
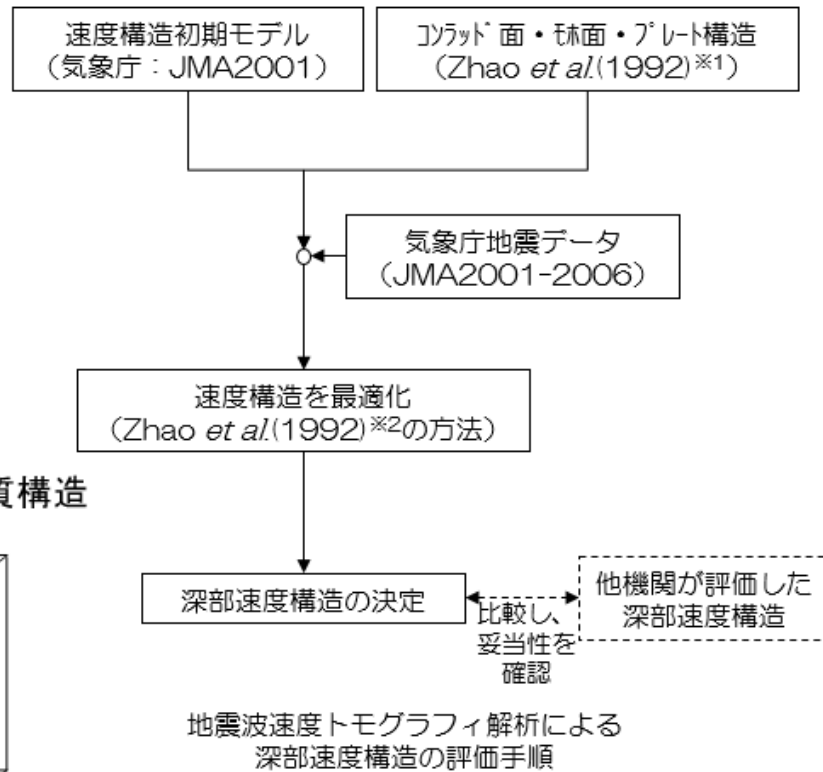
(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

■ 地震波速度トモグラフィ解析の概要

調査(E)

地震基盤面以深の深部地盤の速度構造を把握するため、文献による大規模な地殻構造(コンラッド面、モホ面、プレート)に対して、観測事実に則した最適な速度構造を求める。

そのために、各地の地震観測点で記録された自然地震(主に微小~小地震)の波形記録から到達時刻を読み取ることで得られる観測走時をターゲットに、モデルによる計算走時を最適化することで深部の速度構造を評価する「地震波速度トモグラフィ解析」を用いた。



*1 Zhao, D., S. Horiuchi and A. Hasegawa(1992) : Seismic velocity structure of the crust beneath the Japan Islands, *Tectonophysics*, vol.212, pp.289-301.
*2 Zhao, D., A. Hasegawa and S. Horiuchi(1992) : Tomographic Imaging of P and S Wave Velocity Structure Beneath Northeastern Japan, *J. Geophys. Res.*, vol.97, No.B13, pp.19,909-19,928.

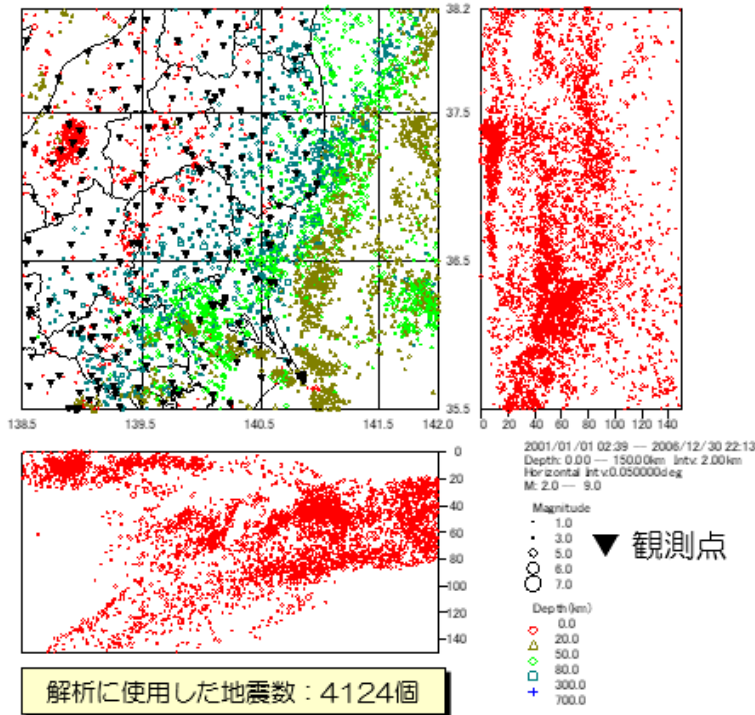
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

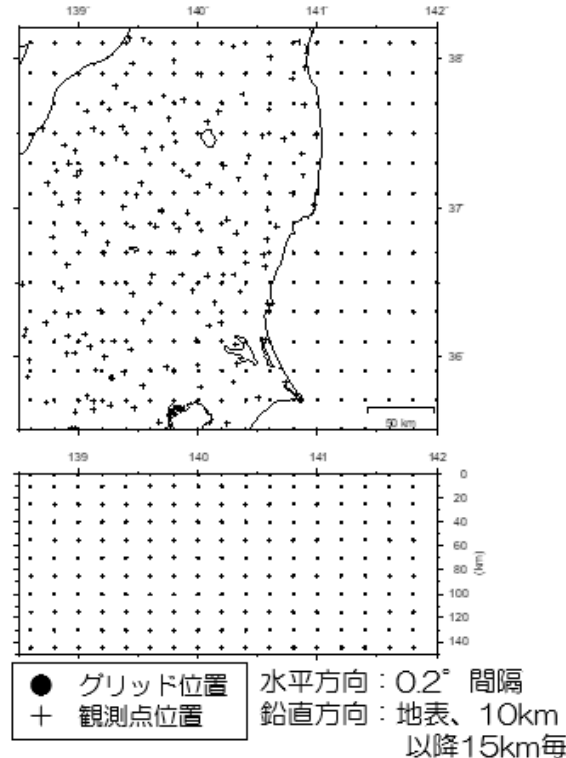
(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

■ 地震波速度トモグラフィ解析において使用した地震・観測点位置と解析範囲

- 解析に使用した地震と観測点及び震源位置は、気象庁・地震カタログに依った（2001-2006年）。
- M2以上の地震を対象に、水平 0.05° ，深さ2 kmの領域で最も観測点数が多い地震を選択。さらに、震源深さの決定精度が1.5 km以下の地震を選択。
- 解析領域内の格子点に初期の速度値を与え、観測走時と計算走時の誤差が最小となるように最適解を求める。
- 解の信頼性についてはレゾリューション行列の対角要素の値を指標とする。Aki and Lee(1976)によると、50%以上であれば解の信頼性は高いとされる。



解析において使用した地震・観測点位置



解析の範囲

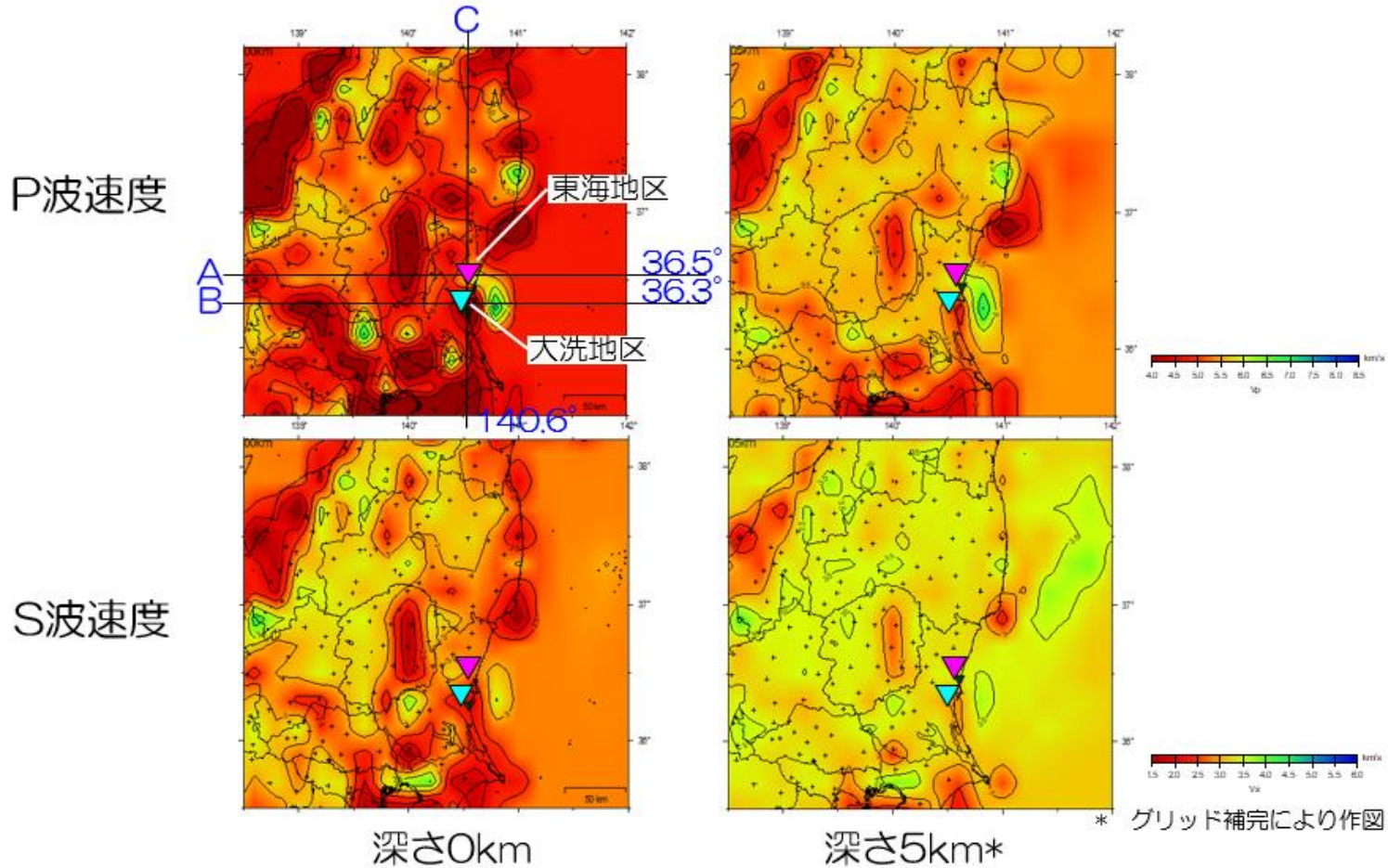
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

■ 解析結果(平面：1/2)

浅部 (~5km)の平面的速度分布を以下に示す。各地域のP波速度及びS波速度が推定された。



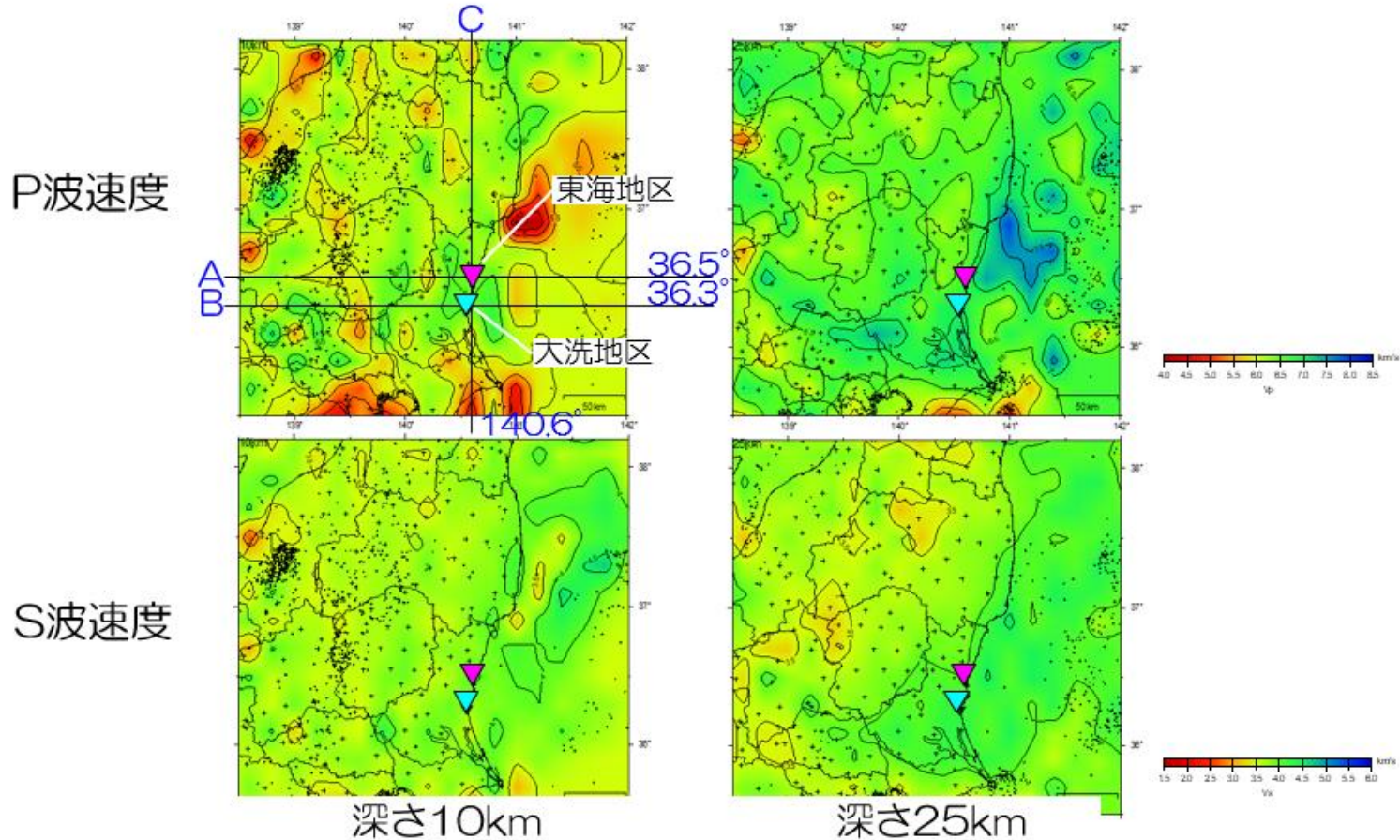
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

■ 解析結果(平面：2/2)

深部(10~25km)の平面的速度分布を以下に示す。各地域のP波速度及びS波速度が推定された。



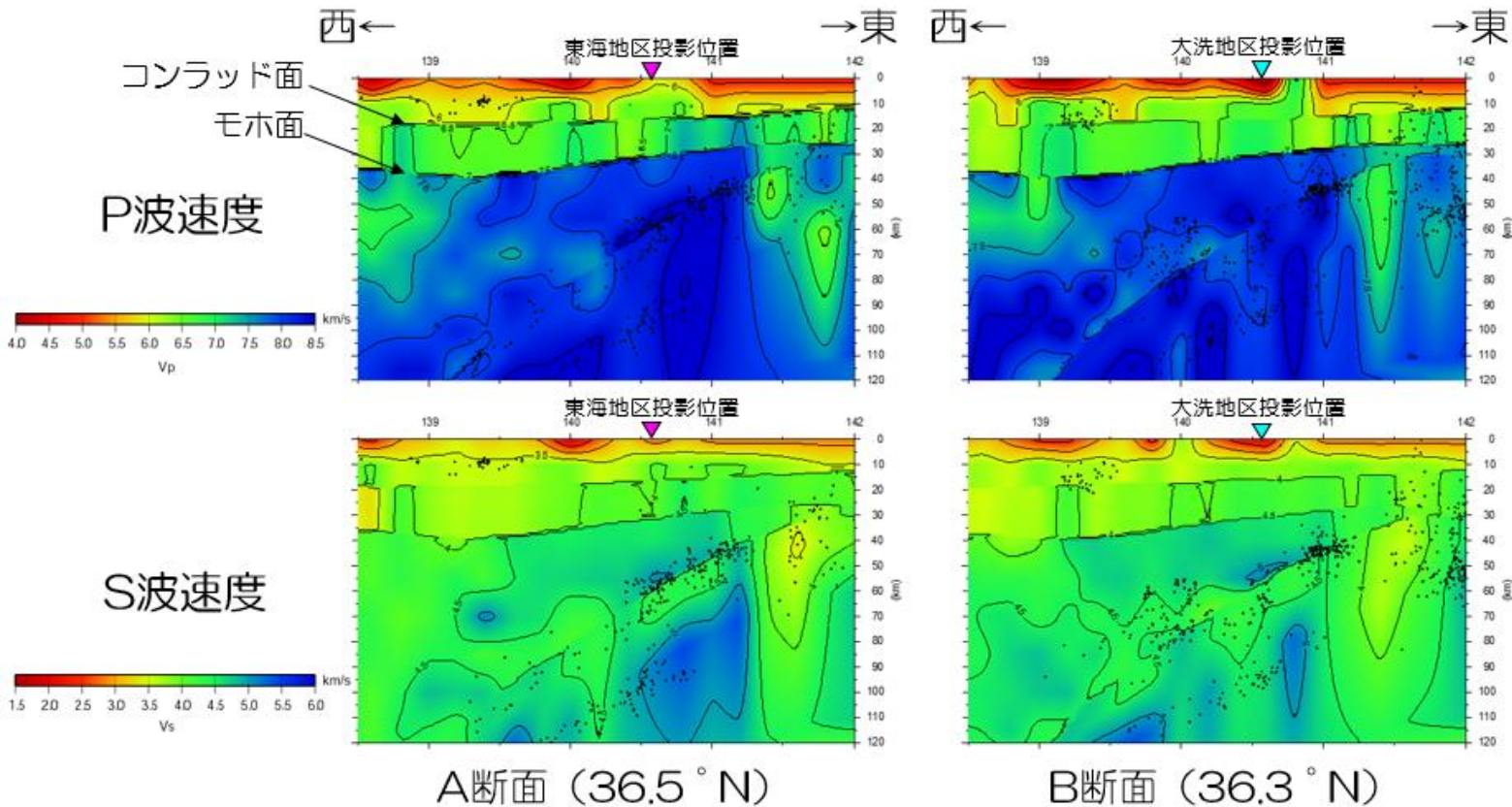
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

■ 解析結果(断面：1/2)

東西断面の速度分布を以下に示す。各深度のP波速度及びS波速度が推定された。



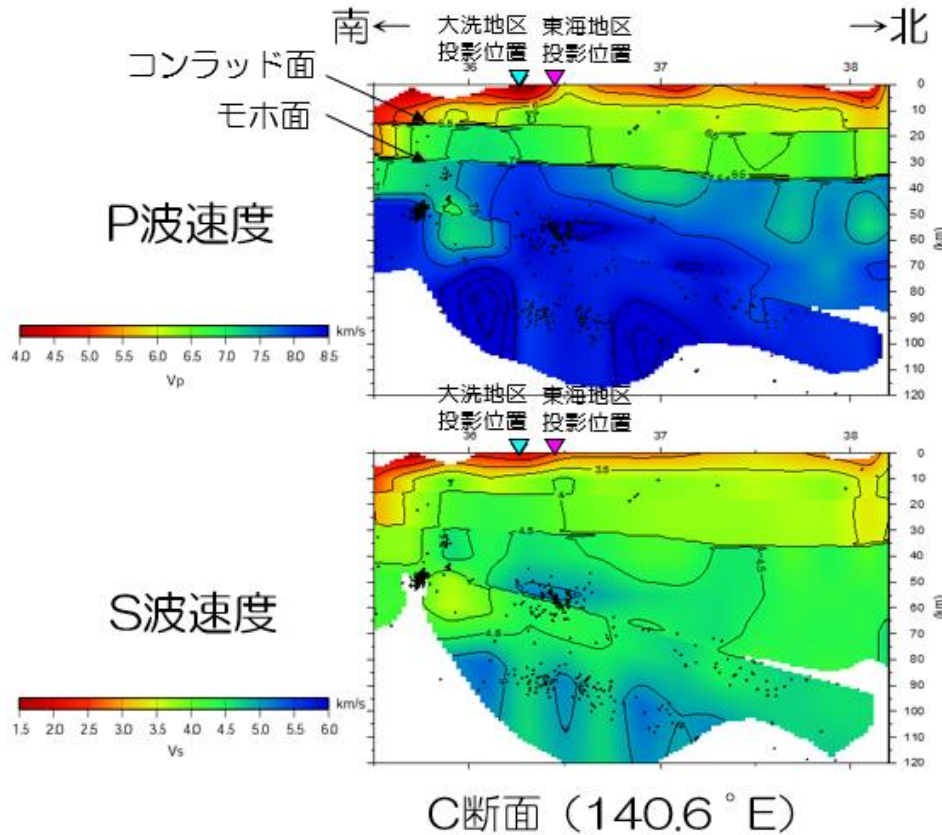
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

■ 解析結果(断面：2/2)

南北断面の速度分布を以下に示す。各深度のP波速度及びS波速度が推定された。



1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

1. 基準地震動 S_s の策定の概要
2. 敷地周辺の地震発生状況
3. 地下構造評価
 - 3.1 評価の方針
 - 3.2 敷地の解放基盤表面の設定
 - 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討
 - 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定
 - 3.5 観測記録及び模擬入力波を用いた敷地地盤の振動特性評価
4. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動
 - 4.1 プレート間地震
 - 4.2 海洋プレート内地震
 - 4.3 内陸地殻内地震
5. 震源を特定せず策定する地震動
6. 基準地震動 S_s の策定
7. 基準地震動 S_s の年超過確率の参照

参考資料

- 参考1 震源を特定せず策定する地震動(Mw6.5以上の地震に関する検討)
 参考2 「日本海溝沿いの地震活動の長期評価」に対する確認結果について

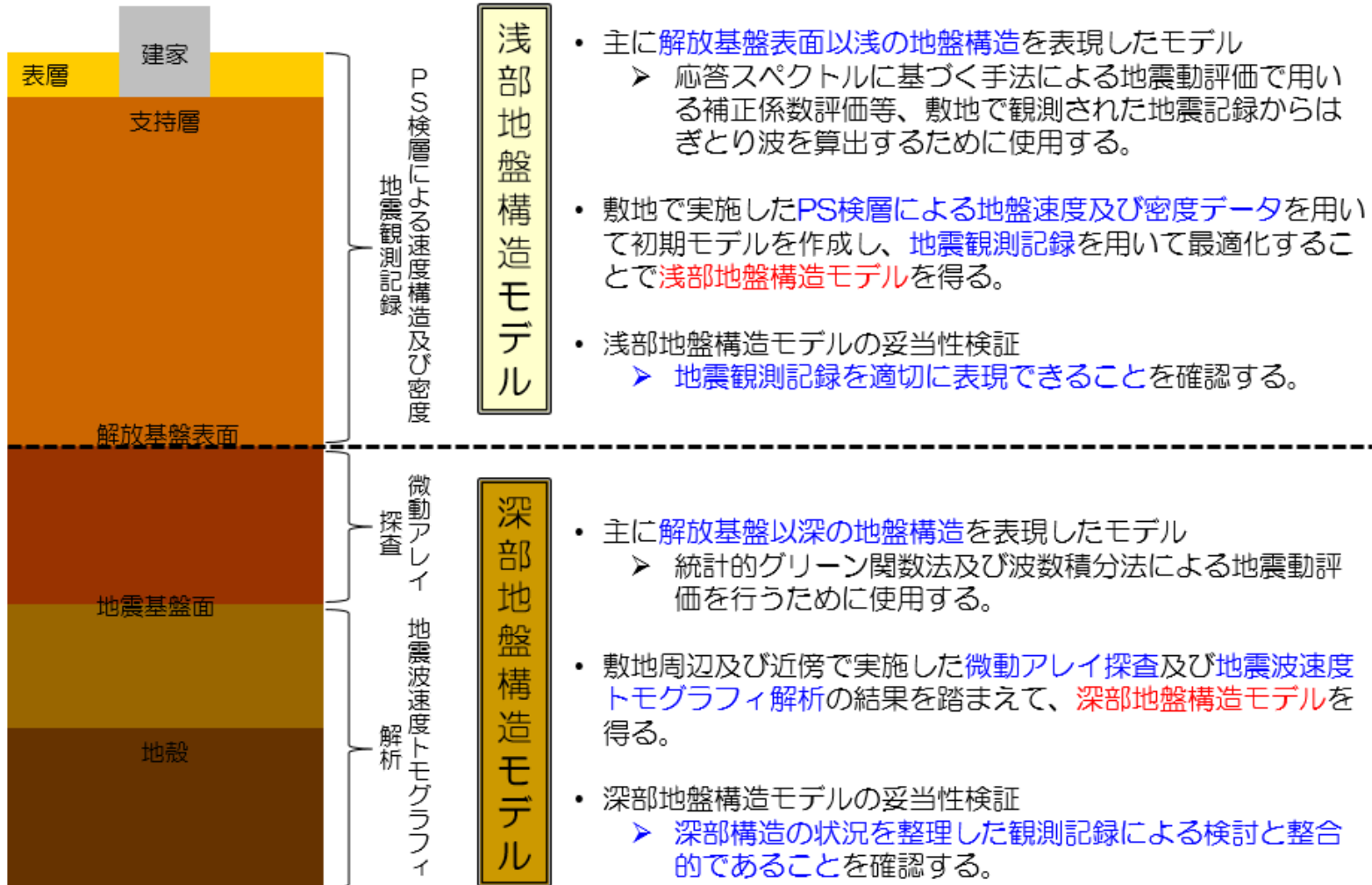
参考文献

1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)



3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定

設定の概要



浅部地盤構造モデル

- 主に解放基盤表面以浅の地盤構造を表現したモデル
 - 応答スペクトルに基づく手法による地震動評価で用いる補正係数評価等、敷地で観測された地震記録からはざとり波を算出するために使用する。
- 敷地で実施したPS検層による地盤速度及び密度データを用いて初期モデルを作成し、地震観測記録を用いて最適化することで浅部地盤構造モデルを得る。
- 浅部地盤構造モデルの妥当性検証
 - 地震観測記録を適切に表現できることを確認する。

深部地盤構造モデル

- 主に解放基盤以深の地盤構造を表現したモデル
 - 統計的グリーン関数法及び波数積分法による地震動評価を行うために使用する。
- 敷地周辺及び近傍で実施した微動アレイ探査及び地震波速度トモグラフィ解析の結果を踏まえて、深部地盤構造モデルを得る。
- 深部地盤構造モデルの妥当性検証
 - 深部構造の状況を整理した観測記録による検討と整合的であることを確認する。

1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定

浅部地盤構造モデルの設定手順

東北地方太平洋沖地震は、敷地において観測された最大の地震であり、地盤の非線形化を考慮し、この地震に特化した地盤構造モデルを作成

初期地盤構造モデルの作成

地震観測点近傍で実施したPS検層による地盤速度及び密度データを用いて初期地盤構造モデルを作成

浅部地盤構造モデルの地盤同定解析

東北地方太平洋沖地震発生以降の敷地地盤の状態を考慮した中小規模の観測地震による浅部地盤構造モデルを作成
地盤構造の平均的な像をモデル化するため、5つの標準的な地震を用いて、水平・鉛直成分の地盤構造モデルを作成

- ・2011年3月11日 15:15 茨城県沖の地震 (東北地方太平洋沖地震の最大余震) (M7.6)
- ・2011年4月11日 17:16 福島県浜通りの地震 (M7.0)
- ・2011年4月11日 20:42 福島県浜通りの地震 (M5.9)
- ・2011年4月12日 8:08 銚子付近の地震 (M6.4)
- ・2011年4月12日 14:07 福島県浜通りの地震 (M6.4)

得られた地盤構造モデルに対して、地震観測記録のシミュレーション解析を行い、そのモデルの妥当性を検証

浅部地盤構造モデル

解放基盤波を用いる検討(応答スペクトルに基づく手法による地震動評価に用いる補正係数の評価等)に使用

東北地方太平洋沖地震用の浅部地盤構造モデルの地盤同定解析

敷地が経験した極めて大きな地震である東北地方太平洋沖地震を詳細に評価するため、NS・EW・UD成分毎に浅部地盤構造モデルを作成

得られた地盤構造モデルに対して、地震観測記録のシミュレーション解析を行い、そのモデルの妥当性を検証

東北地方太平洋沖地震用の浅部地盤構造モデル

東北地方太平洋沖地震の本震の解放基盤波の評価に使用

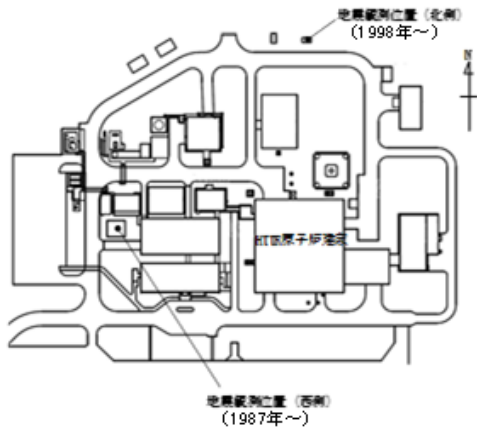
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定

初期地盤構造モデルの作成

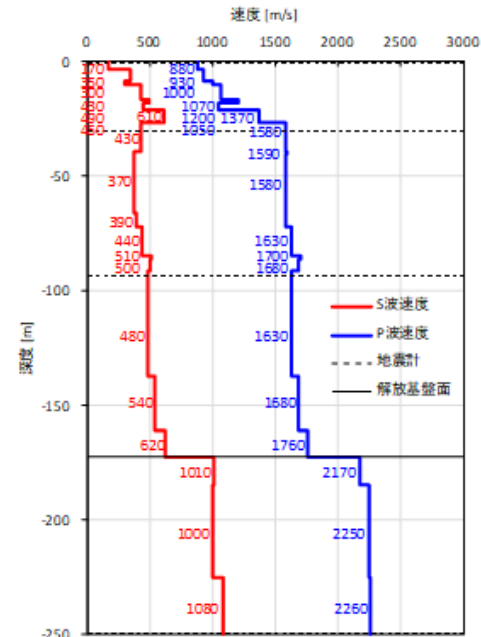
■ 初期地盤構造モデルの諸元

浅部地盤構造モデルを評価するために作成する初期の地盤構造モデルについては、2章で設定した解放基盤表面を基本とし、地震観測位置の近傍で実施した各種地質調査のデータを用い、層厚・密度・せん断波速度を設定した。



上面 G.L. (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	初期値	
			S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)
▽ 0.0	1.0	1.33	170	880
-1.0	2.3	1.33	170	880
-3.3	5.4	1.92	350	930
-8.7	1.5	1.74	300	1000
-10.2	6.2	1.84	430	1070
-16.4	1.9	1.79	490	1200
-18.3	2.6	1.78	450	1050
-20.9	5.7	2.02	610	1370
▽ -26.6	3.4	1.86	430	1580
▽ -30.0	2.0	1.86	430	1580
-32.0	7.3	1.86	430	1580
-39.3	1.1	1.89	370	1590
-40.4	25.5	1.84	370	1580
-65.9	6.3	1.81	390	1580
-72.2	12.4	1.92	440	1630
-84.6	1.4	2.05	510	1700
-86.0	5.1	1.97	500	1680
▽ -91.1	2.9	1.79	480	1630
-94.0	1.0	1.79	480	1630
-95.0	42.1	1.79	480	1630
-137.1	23.6	1.82	540	1680
▼ -160.7	11.8	1.81	620	1760
▽ -172.5	1.5	1.98	1010	2170
-174.0	10.9	1.98	1010	2170
-184.9	40.2	2.00	1000	2250
▽ -225.1	24.9	1.85	1080	2260
-250.0	=	1.85	1080	2260

▽ : 地震計位置
▼ : 解放基盤面位置



1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定

浅部地盤構造モデルの地盤同定解析

■ 地盤同定解析の諸条件及び浅部地盤構造モデルの評価結果

東北地方太平洋沖地震以降に発生した5つの地震観測記録を用いた地盤同定結果から得られた浅部地盤構造モデルの諸元を下表に示す。

- 一次元波動論に基づく理論伝達特性を当てはめる逆解析により同定
- ターゲットは、フィルタ処理(Parzenウィンドウ(0.2Hz))を施した、観測記録の伝達関数
- 同定対象は各層の速度、及び表層(GL-3m以浅)、上部層(GL-3m~27m)、中部層(GL-27m~91m)、下部層(GL-91m以深)の減衰定数
- 遺伝的アルゴリズムを用い、初期乱数を変えた10回の計算を実施し、最も適合度のよい計算結果を最適地盤モデルとして採用
- 探索範囲は以下の通り設定
 - 【速度】
表層：初期モデルの0.8~1.0倍
上部層：初期モデルの0.8~1.2倍
下部層：初期モデルの0.8~1.2倍
(ただし、解放基盤表面以深は固定)
 - 【減衰定数】
 $h(f) = h_0 \times f^{-\alpha}$
 h_0 は0.0~1.0
 α は0.0~2.0
- 地震毎に評価された最適地盤モデルのうち、NS成分及びEW成分を平均化することで水平成分のモデルとした

上層 G.L. (m)	層厚 (m)	速度 (s/cm ²)	水平成分									
			S波速度 (m/s)	減衰定数h ⁺		P波速度 (m/s)	減衰定数h ⁺					
				h ₁	α		h ₁	α				
0.0	1.0	1.33	153	0.565	0.734	819	0.250	1.194				
-1.0	2.3	1.33	149			787						
-3.3	5.4	1.92	334			761						
-5.7	1.5	1.74	300	0.726	1.125	940	0.918	0.744				
-10.2	6.2	1.54	439			880						
-16.4	1.9	1.79	447			1239						
-18.3	2.6	1.78	415			1020						
-20.9	5.7	2.02	527			1118						
-26.6	3.4	1.55	411			1354						
-30.0	2.0	1.55	411	1354	0.155	1.347	0.922	1.094				
-32.0	7.3	1.55	448	1435								
-39.3	1.1	1.59	387	1696								
-40.4	25.5	1.54	372	1633								
-66.9	6.3	1.51	353	1595								
-72.2	12.4	1.92	398	1768								
-84.6	1.4	2.05	514	1664								
-86.0	5.1	1.97	452	1735								
-91.1	2.9	1.79	452	1668					0.064	0.859	0.667	1.719
-94.0	1.0	1.79	452	1668								
-95.0	42.1	1.79	501	1670								
-137.1	23.6	1.52	609	1928								
-160.7	11.8	1.51	663	1978								
-172.5	1.5	1.95	1010	2170								
-174.0	10.9	1.95	1010	2170								
-194.9	40.2	2.00	1000	2250								
-225.1	24.9	1.55	1080	2250								
-250.0	∞	1.55	1080	2250								

※ h₁, αはf⁺ ここで利用減衰定数(h₁)

1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)



3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定
東北地方太平洋沖地震用の浅部地盤構造モデルの地盤同定解析

■ 地盤同定解析の諸条件及び東北地方太平洋沖地震用の浅部地盤構造モデルの評価結果

東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いた地盤同定結果から得られた東北地方太平洋沖地震用の浅部地盤構造モデルの諸元を下表に示す。

上層 G.L. (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	NS方向				EW方向				鉛直方向			
			S波速度 (m/s)	減衰定数h ⁰		S波速度 (m/s)	減衰定数h ⁰		P波速度 (m/s)	減衰定数h ⁰				
				h ₀	α		h ₀	α		h ₀	α			
0.0	1.0	1.33	151	0.641	0.266	148	0.547	0.344	740	0.484	0.188			
-1.0	2.3	1.33	147			137			712					
-3.3	5.4	1.92	282	0.188	0.297	302	0.266	0.438	744	0.531	0.344			
-6.7	1.5	1.74	240			240			1105					
-10.2	6.2	1.84	434			404			938					
-16.4	1.9	1.79	451			513			1227					
-18.3	2.6	1.78	391			450			1127					
-20.9	5.7	2.02	500			538			1522					
-26.6	3.4	1.86	363	0.078	0.922	344	0.125	0.844	1284	0.568	0.922			
-30.0	2.0	1.86	450			382			1645					
-32.0	7.3	1.86	450			382			1645					
-39.3	1.1	1.89	364			352			1444					
-40.4	25.5	1.84	298			355			1356					
-65.9	6.3	1.81	411			354			1495					
-72.2	12.4	1.92	450			514			1854					
-84.6	1.4	2.05	414			586			1490					
-86.0	5.1	1.97	549			438			1589					
-91.1	2.9	1.79	442			509			1708					
-94.0	1.0	1.79	588	485	1656									
-95.0	42.1	1.79	588	485	1656									
-137.1	23.6	1.82	583	0.068	0.797	593	0.068	0.703	1771	0.297	0.958			
-160.7	11.8	1.81	669			535			2090					
-172.5	1.5	1.98	1010			1010			2170					
-174.0	10.9	1.98	1010			1010			2170					
-184.9	40.2	2.00	1000			1000			2280					
-225.1	24.9	1.85	1080			1080			2280					
-250.0	∞	1.85	1080			1080			2280					

* $h = h_0 \times f^{-\alpha}$ ここでfは周波数(Hz)

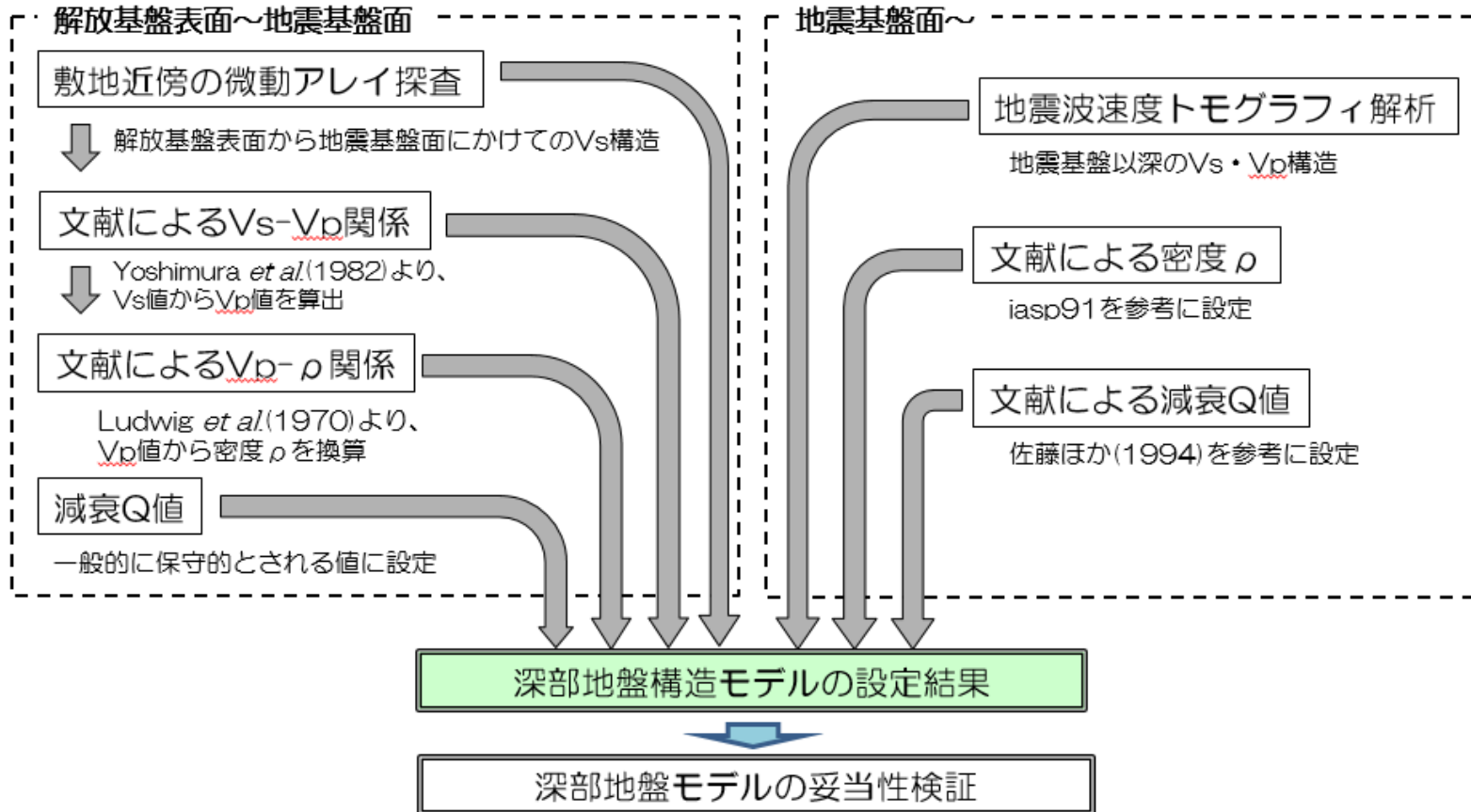
- 一次元波動論に基づく理論伝達特性を当てはめる逆解析により同定
- ターゲットは、フィルタ処理 (Parzen ウィンドウ(0.2Hz)) を施した、観測記録の伝達関数
- 同定対象は各層の速度、及び表層(GL-3m以浅)、上部層(GL-3m~27m)、中部層(GL-27m~91m)、下部層(GL-91m以深)の減衰定数
- 遺伝的アルゴリズムを用い、初期乱数を変えた10回の計算を実施し、最も適合度のよい計算結果を最適地盤モデルして採用
- 探索範囲は以下の通り設定
 - 【速度】
表層：初期モデルの0.8~1.0倍
上部層：初期モデルの0.8~1.2倍
下部層：初期モデルの0.8~1.2倍
(ただし、解放基盤表面以深は固定)
 - 【減衰定数】
 $h(f) = h_0 \times f^{-\alpha}$
 h_0 は0.0~1.0
 α は0.0~1.0

1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定

深部地盤構造モデルの設定手順

深部地盤構造モデルの設定手順を以下に示す。



1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)



3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定

深部地盤構造モデルの設定結果

前節の設定手順に従って設定した深部地盤構造モデルの諸元を以下に示す。

上面 G.L. (km)	層厚 (km)	密度 (g/cm ³)	水平方向		鉛直方向	
			S波速度 (km/s)	減衰定数 [※]	P波速度 (km/s)	減衰定数 [※]
				Q _s		Q _p
0.000	0.173	—	—	—	—	—
-0.173	0.100	1.98	1.010	100	2.170	100
-0.273	0.350	2.11	1.186		2.590	
-0.623	0.670	2.44	2.086		4.100	
-1.293	2.708	2.68	3.052	110 × f ^{0.69}	5.750	110 × f ^{0.69}
-4.000	11.900	2.70	3.600		5.960	
-15.900	14.600	2.80	4.170		6.810	
-30.500	∞	3.20	4.320		7.640	

浅部地盤構造モデルと同様

微動アレイ探査結果より設定

地震波速度トモグラフィ解析結果より設定

※ fは周波数(Hz)

Yoshimura *et al.*(1982)^{※1}に示されるV_s-V_pの関係式より算出

Ludwig *et al.*(1970)^{※2}に示されるV_p-ρの関係式より算出

iasp91^{※3}を参考に設定

保守的な減衰Q値を設定

佐藤ほか(1994)^{※4}を参考に設定

- ※1 Masayoshi Yoshimura, Seishi Fujii, Kenji Tanaka, and Ken Morita (1982) : On the relationship between P and S-wave velocities in soft rock, SEG Expanded Abstracts 1, 143.
- ※2 Ludwig, W. J., J. E. Nafe, and C.L. Drake (1970) : Seismic Refraction, in "The Sea, Vol.4", edited by A.E. Maxwell, Wiley Interscience, New York, 53-84.
- ※3 Kennett, B. L. N. and E. R. Engdahl (1991) : Traveltimes for global earthquake location and phase identification, Geophys. J. Int., 105, 429-465.
- ※4 佐藤智美川瀬博佐藤俊明(1994) 表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性, 仙台地域のポアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析, 日本建築学会構造系論文集, 第462号, pp.79-89.